

振動給圧式ボーリングによるサウンディングの開発 —掘削条件が及ぼす影響と適用性の検討—

三枝弘幸¹・谷 和夫²・金子 進³・我妻達弥¹

¹ 学生会員 横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79 番 5 号)

² Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79 番 5 号)

³ 基礎地盤コンサルタンツ (株) (〒263-0005 千葉市稲毛区長沼原町 51)

岩石や岩盤の強度特性を評価する一般的な手法は、現場で行う原位置岩盤せん断試験とサンプリングした試料を用いて室内で行う岩石せん断試験である。しかし、これらのせん断試験は高コストで時間や労力がかかるため、地盤調査の初期段階における概略把握には不適切である。一方、ボーリングの際に掘削変数を計測する技術が注目を集めている。この計測ボーリングの技術を利用して、原位置で簡便に岩石や岩盤の強度特性を推定する“振動給圧式ボーリング (ID-CCT) によるサウンディング手法”が実用的な調査手法として提案されている。本研究では、この ID-CCT サウンディングに着目し、掘削条件が結果に及ぼす影響と多様な地盤種別に対する適用性について模型実験を行って検討した。

Key Words : *instrumented drilling, sounding, rock, measurement, model test, shear strength*

1. はじめに

(1) 岩石や岩盤の強度特性を評価する調査・試験

現在、岩石や岩盤の強度特性を評価するために行う調査・試験の方法は、表-1 に示すように多岐にわたっている。一般に、地質・地盤調査の初期段階には地表地質踏査や物理探査が行われ、大まかな地質構造と各地質体の強さや硬さが岩盤分類や弾性波速

度より概略評価される。しかし、その推定の精度は低く、岩盤の安定性評価にとって重要な破砕帯などの弱構造部のせん断強さに関する情報を得ることは難しい。一方、調査の最終段階では、設計に利用する強度特性が厳密に評価される。多くの場合、岩石のせん断強さについてはサンプリングした試料を用いて室内で行う岩石せん断試験によって、岩盤のせん断強さについてはボーリング孔や露頭ないし調査

表-1 岩石や岩盤の強度特性を評価する調査・試験の方法

調査・試験の分類	調査・試験の方法	強度特性の求め方	特徴および問題点
地表地質踏査	岩盤分類	岩級区分より強度特性を推定 (経験則)	・低コストで簡便 ・推定精度、深度分解能が低い
物理探査	弾性波探査	弾性波速度より強度特性を推定 (経験則)	・低コストで簡便 ・推定精度、深度分解能が低い
サウンディング	計測ボーリングの技術を利用した手法	掘削時の掘削変数より強度特性を推定 (経験則)	・低コストで簡便 ・深度分解能が高い ・方法が多岐にわたる ・適用性の検討が不十分
室内で行う岩石せん断試験	一軸・三軸圧縮試験、一面せん断試験など	供試体をせん断破壊させた時の応力より強度定数を決定	・最も一般的な岩石強度の調査法 ・高コストで時間や労力が大 ・サンプリングによる乱れが問題
ボーリング孔で行う 載荷試験	プレッシャーメータ試験	円孔拡大理論により強度定数を推定	・大深度にも適用可 ・高コストで時間や労力がやや大
	孔壁せん断試験	孔壁をせん断破壊させた時の応力より強度定数を決定	・孔壁の乱れが問題 ・適用性の検討が不十分
露頭や調査坑で行う 載荷試験	原位置岩盤せん断試験	試験体 (岩盤) をせん断破壊させた時の応力より強度定数を決定	・最も一般的な岩盤強度の調査法 ・高コストで時間や労力が極めて大 ・試験体の乱れが問題

表-2 計測ボーリングによるサウンディングで岩石や岩盤の強度特性を評価する主な方法

名称	掘削方法	利用する掘削変数	評価する強度特性値	コア採取の可否	適用範囲	文献番号
振動給圧式 ボーリングによる サウンディング	ロータリー・ ドリリング	軸力, トルク	強度定数 (c, ϕ)	×	地盤調査一般	2
				○		3
ロータリー・ サウンディング	ロータリー・ ドリリング	軸力, トルク, 回転数, 掘進速度	一軸圧縮 強さ	×	改良地盤の 品質管理	4
エンバソル		削孔エネルギー (軸力, トルク, 回転数, 掘進速度)				5
打撃式 サウンディング	パーカッション・ ドリリング	削孔打撃エネルギー (打撃力, 軸力, トルク, 回転数, 打撃回数, 掘進速度)			トンネル切羽 の前方調査	6
MWD検層					地盤調査一般	7

坑で行う各種の原位置岩盤せん断試験によっている。しかし、これらのせん断試験は簡便ではないため、調査の初期段階における概略把握には利用することができない。

初期調査の目的は、立地可能性、構造物の配置、詳細調査の計画、施工方法などを検討するための情報収集である。したがって、これらの検討に不可欠な大規模な破碎帯や弱構造部については、その概略を把握する必要がある。そのため、低い精度だが低コストで簡便な地表地質踏査や物理探査と、高い精度だが高コストで時間や労力がかかる各種せん断試験の中間的な調査手法があると便利である。このような調査手法として、土質地盤に対しては標準貫入試験やコーン貫入試験などの各種サウンディングが一般的である。しかし岩盤に対しては、抵抗体を貫入することは容易ではないため、貫入タイプのサウンディングは適切ではない。

一方、調査の初期段階から必ず実施されるボーリング調査において、削孔時の掘削変数を計測して得

られる情報を積極的に利用しようとする計測ボーリング (Instrumented drilling) の技術が注目を集めている¹⁾。計測される掘削変数は地盤の堅さ (硬軟の程度) を反映していると考えられるので、抵抗体の貫入が困難な岩盤や硬質地盤に対する低コストで簡便なサウンディングとしての利用が期待されている。また、削孔の進行と共にデータが連続的に得られるために深度分解能が高く、岩盤の不均質性や、破碎帯などの弱層の評価にも優れている。

(2) 計測ボーリングによるサウンディング

計測ボーリングによるサウンディングで、岩石や岩盤の強度特性を評価する方法として提案されている主なものを表-2に示す。

先端ビットを孔底に打撃する時の衝撃力で岩盤を破碎するパーカッション・ドリリングの場合は、掘進速度を一定に保って掘削し、打撃エネルギーを求めて一軸圧縮強さに換算する手法が実用化されている^{6), 7)}。ビットを押圧・回転する時の推力と摩擦力

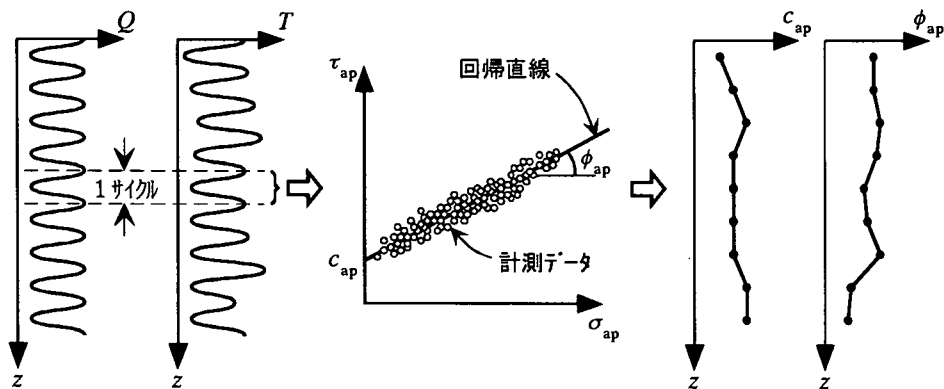


図-1 振動給圧式ボーリングによるサウンディングの概念

で岩盤を圧碎・切削・摩滅するロータリー・ドリリングの場合にも、同様の手法が提案されている^{4),5)}。さらに、軸力を周期的に変動させて掘削し、計測された軸力とトルクより強度定数を評価する振動給圧式ボーリング (Instrumented drilling under cyclically controlled thrust) によるサウンディング (以後、ID-CCT サウンディングと称す) が実用化されている^{2),3)}。

これらの方法の中で、特殊な用途に限定されず、広く一般の地質・地盤調査の一環として適用することを考えると、以下の2点より ID-CCT サウンディングが最も相応しいと考えられる。

- 1) 地盤設計の検討がしやすい地盤の強度定数 (粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ) を直接に推定することができる。
- 2) コアを採取できるので、柱状図と比較しながら地盤の地質、種類、その特性などを解釈することができる。

(3) 振動給圧式ボーリングによるサウンディング

ID-CCT サウンディングは、岩盤掘削で一般的なロータリー・ドリリングにおいて、計測ボーリングの技術を利用してビットに作用する軸力 Q とトルク T を連続的に計測して岩盤の強度指標を推定する手法である²⁾。全断面 (ノンコア) 掘削でも良いが、通常のコア・サンプリングでも利用できる。

計測原理の概念を図-1 に示す。順調な掘削が阻害されない範囲内において、軸力 Q を適当な振幅と周波数で周期的に変動させ、ビット切羽に作用する押圧力 (軸力 Q) に対する切削による回転抵抗 (トルク T) の関係を幅広い応力域にわたって得る。そして、以下に示す換算式によって、見かけの垂直応力 σ_{ap} と見かけのせん断応力 τ_{ap} を求める。

$$\sigma_{ap} = Q / A_{bit}$$

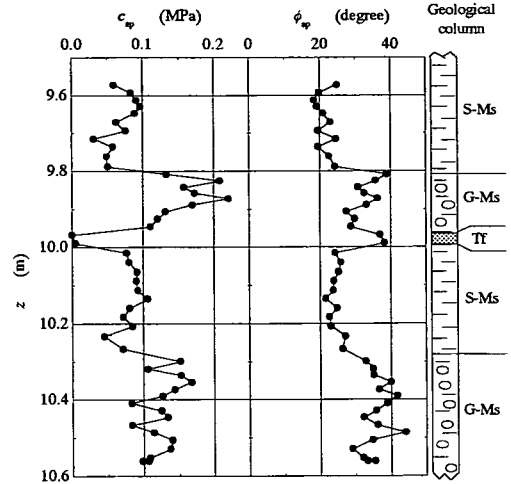


図-2 ID-CCT サウンディングの計測例³⁾
(右側の柱状図の記号 S-Ms, G-Ms, Tf は、砂質泥岩、礫質泥岩、火山灰層を示す)

$$\tau_{ap} = T / G_{bit}$$

ただし、ビット切羽の断面積と断面一次モーメントをそれぞれ A_{bit} , G_{bit} とする。1 サイクル毎の σ_{ap} と τ_{ap} の関係をクーロンの破壊規準と同様の方法により整理し、回帰直線の切片を見かけの粘着力 c_{ap} 、傾きを見かけのせん断抵抗角 ϕ_{ap} として求めることができる。

三浦層群の砂岩泥岩互層 (三浦半島の小田和湾近郊) において、呼び径 86 mm のスリーブ内蔵 2 重管式コアバレルを用いて ID-CCT サウンディングを実施した例を図-2 に示す³⁾。軸力変動の周波数は 0.1 Hz で、掘進速度は 0.1~0.3 cm/sec だったので、軸力変動の 1 周期当たりの掘進量、すなわち強度指標を推定する深度分解能は約 2 cm と非常に高い。図の右側に示したコア観察の結果と比較すると、各地

表-3 振動給圧式ボーリングによるサウンディングの実施例

対象とした地盤	掘削条件							文献番号
	ビットの種類	軸力			スピンドルの回転数 (rpm)	循環水の送水量 (l/min)	掘進速度 (cm/sec)	
		振幅中心 (kN)	両振幅 (kN)	周波数 (Hz)				
ローム砂	D	0.3-0.6	0.6-0.8	0.5	120	—	0.05-0.3	2
		3.5-4.5	1.0-2.0					
砂岩泥岩互層	ID	1.5-2.5	2.0-4.0	0.1	120	10-36	0.1-0.3	3,8
砂	MC	1.0-4.5	0.5-1.5	0.1&0.2	30	30-50	0.1-0.4	9

注: D はドラック・ビット, ID はインフラゲネティッド・ダイヤモンド・ビット, MC は超硬メタル・クラウン・ビット

層・各岩種に対する概略の強度特性が見かけの強度定数という指標で調和的に評価されることが分かる。また同一の岩種に対しても、データのばらつきより強度に関する不均質性の程度が推定できる。さらに重要な点は、細粒分が循環水で容易に流失しやすい未固結な弱層や破砕帯などの評価に資する情報も得られることである。たとえば、深度 10 m 付近に挟在する層厚が 2 cm 程度の固結度が低い火山灰層 Tf は、強度特性が推測できる程度に良質なコアを得ることが不可能だが、ID-CCT サウンディングによって粘着力が非常に小さい薄層として評価される。

表-3 に ID-CCT サウンディングの実施例を示す。対象とした地盤によって掘削条件が異なっており、またデータ数が少ないため、手法としての適用性を十分に議論できる段階には至っていない。そこで、以下の 2 点が課題として挙げられる。1 点目は、掘削条件が計測結果にどのような影響を及ぼすのか明らかにすることである。そして、サウンディングとして最適の振動給圧の制御条件を提案する必要がある。さらに 2 点目は、適用する地盤の種類を増やし実績を積み上げて、サウンディングとしての適用性を高めることである。特に岩盤の施工現場で問題になりやすい軟岩や、評価が困難な礫岩などの不均質岩に対するデータが不足している。

(4) 研究の目的と検討方法

岩石や岩盤の強度特性を評価する低コストで簡便なサウンディングとして、ID-CCT サウンディングに注目し、以下の 2 点を研究の目的とした。

- 1) 掘削条件が計測結果に及ぼす影響を検討し、サウンディングとして最適な振動給圧の制御条件を明らかにする。
- 2) 軟岩や不均質岩（礫岩など）に対するデータを収集し、手法としての適用性を高める。

データの収集とは、ID-CCT サウンディングを行って得られた見かけの強度定数と、同じ岩種に対する三軸圧縮試験による強度定数を比較する事例を積み上げることを意味する。よって、実験的な検討によって研究を進めることになる。一方、掘削条件の影響を検討する実験には、以下の 3 つの方法が考えられる。

- ① 実機のボーリング機械を用いて実地盤を掘削する方法¹⁰⁾
- ② 実機のボーリング機械を用いて模型地盤を掘削する方法¹¹⁾
- ③ 模型ボーリング装置を用いて模型地盤を掘削する方法¹²⁾

①の方法は、データの信頼性が高いが、問題点と

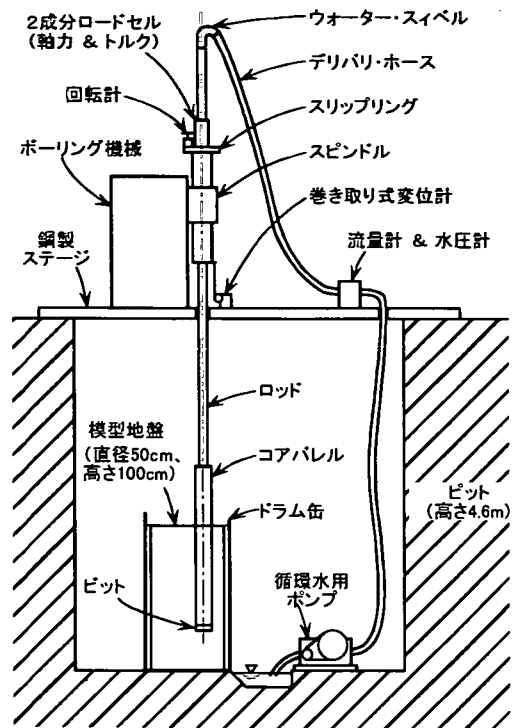


図-3 模型実験の装置

して実地盤が複雑で同一条件下の実験を繰り返すことが困難であること、および高コストであることが挙げられる。また③の方法は、低コストでパラメトリックな実験に適しているが、模型装置と実機のボーリング機械による掘削条件の相違が問題である。そこで、本研究では②の方法を採用した。模型地盤を利用することにより、地盤の条件に関しては制御された環境下で実験を行うことができ、実機のボーリング機械を用いることで実地盤における掘削と同一の掘削条件を再現できることがメリットである。

模型地盤には、自然地盤より採取した 2 種類の軟岩を用いた。そして、掘削条件をさまざまに変化させて ID-CCT サウンディングを行い、得られる見かけの強度定数に影響を及ぼす因子を検討した。

さらに、模型地盤だけでなく既往の実地盤におけるデータも再整理し、ID-CCT サウンディングと三軸圧縮試験より求まる強度定数を比較して、サウンディング手法としての適用性を検討した。

2. 模型実験の概要¹³⁾

(1) 実験装置

図-3 に実験装置の概要を示す。深さ 4.6 m のピット

トの上面に設けた鋼製ステージにボーリング機械を設置し、ビットの底面に固定した模型地盤を掘削する。実際のボーリング現象を忠実に再現するため、ボーリング機械は油圧フィード・スピンドル型の実機（鉦研工業（株）製、OE-2L型）で、ロッド（呼び径 42 mm）、コアバレル（スリーブ内蔵二重管式、呼び径 86 mm、採取長 1.2 m）も実地盤で用いられる一般的な仕様のものを使用した¹⁴⁾。

計測ボーリングのための計測システムは、掘削深度が浅いので地上ユニットのみとした。計測した6項目の掘削変数を表-4に示す¹⁰⁾。ロッドに伝達される軸力とトルクは、回転するスピンドルにロードセルを取り付け、光学式スリップリングによってデータをリアルタイムに伝達する。循環水の送水量と送水圧はデリバリ・ホースの途中に、さらにスピンドルの軸変位（掘削深度）と回転変位はボーリング機械の非回転部位に計器を設置して計測した。

振動給圧制御時の各掘削変数の変動を詳細に捉えるため、計測間隔は 50 msec (20 Hz) と高密度にデータを測定した。また、パソコンに取り込んだデータは、リアルタイムにモニターにグラフ表示することができる。

(2) 模型地盤

自然地盤より採取した2種類の堆積軟岩を用いた。1つは、均質性の高いシルト岩で、もう1つは直径が数 cm の礫を含む不均質な凝灰角礫岩である。特徴および、力学・物理特性（一軸圧縮強さ q_u 、単位体積重量 γ_t 、含水比 w ）、現地で計測された弾性波速度（P波速度 V_p 、S波速度 V_s ）を表-5に示す。

露頭より呼び径 500 mm のコアバレルで切り出した高さが約 1 m の飽和状態の円柱形状の試料には、目立った節理や破砕帯は観察されなかった。この試料をドラム缶（内径 600 mm、高さ 1200 mm）に入れ、モルタルで隙間を充填して模型地盤とした。

(3) 実験ケース

ビットの種類は、岩盤の削孔に一般的なサーフェス・セット・ダイヤモンド・ビット（SDビット）とインブリグネーティッド・ダイヤモンド・ビット（IDビット）、さらに超硬メタル・クラウン・ビット（MCビット）の合わせて3種類を使用した。また、循環水には清水を用いた。

掘削の制御は給圧制御方式とし、経験38年のベテランのボーリング機長（フォアマン）が操作した。シルト岩と凝灰角礫岩の模型地盤に対して、約1mの孔をそれぞれ12本と15本掘削した。ID-CCT サウンディングの実験ケースを表-6に示す。掘削条件の

表-4 計測ボーリングの掘削変数

計測器の動き	計測対象	項目	計測事項
回転系	荷重	軸力 Q	スピンドルからロッドに加えられる軸力
		トルク T	スピンドルからロッドに加えられるトルク
静止系	循環水	送水量 q	ポンプからの吐出流速
		送水圧 P	ポンプからの吐出圧力
	変位	深度 z	スピンドルの軸変位（掘削深度）
		回転数 R	スピンドル（ロッド）の回転変位

表-5 模型地盤の特性

岩種	シルト岩	凝灰角礫岩
地質	新第三紀鮮新世後期の海成堆積物	中新世の流紋岩質のグリーンタフ
地層	仙台層群上部の大年寺層の上部層	宇都宮市大谷町の粗目大谷石
V_p (m/sec)	1200~1650	2600~2800
V_s (m/sec)	450~550	1100~1250
q_u (MPa)	1.8~3.5	3.7~8.6
γ_t (kN/m^3)	16.0~17.3	18.0~19.0
w (%)	45.0~53.0	23.0~25.0

制御項目が多いため、基本条件を設定し、それを元に掘削条件のうち1つの制御項目のみを表-3に示す実施例を考慮して変化させた。

この基本条件は、ボーリング機長（フォアマン）が両模型地盤に対して最良と判断した条件、すなわち、サーフェス・セット・ダイヤモンド・ビット（SDビット）を用い、スピンドルの回転数 R は 120 rpm、循環水の送水量 q は 20 l/min で、振動給圧の制御条件については軸力の振動中心 Q_m は 1.0 kN、両振幅 ΔQ は 1.0 kN、周波数 f は 0.5 Hz である。ビットの種類は1孔（掘削長 1 m）を掘削する間に変えないが、掘削長 100 ~ 200 mm 毎にスピンドルの回転数

表-6 実験ケース

掘削条件の設定項目		基本条件	変動させる条件
ビットの種類		SD	SD, ID, MC
軸力	振動中心 Q_m (kN)	1.0	0.7~2.3 (連続的に変化)
	両振幅 ΔQ (kN)	1.0	0.2~1.5 (連続的に変化)
	周波数 f (Hz)	0.5	0.0 ^{±1)} , 0.01, 0.1, 0.5, 1.0
スピンドルの回転数 R (rpm)		120	30, 60, 120, 240
循環水の送水量 q (l/min)		20	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45

注1) 段階給圧条件に対応

R は4段階、送水量 q は9段階、周波数 f は3段階に変化させ、軸力の振動中心 Q_m と両振幅 ΔQ は順調な削孔が阻害されない範囲で連続的に変化させた。また、振動給圧条件の実験の他に、段階的に給圧を変化させる段階給圧条件の実験(周波数0 Hzの振動給圧式に対応する条件)も比較のために実施した。

計測された掘削変数の解析では、循環水の水压が軸力の計測に及ぼす影響を考慮しなければならない。そこで、ビットの種類ごとにキャリブレーションを行って補正関係を求めた。この補正の精度など詳細については、谷他(1999)¹⁰⁾を参照されたい。

3. 模型地盤を用いた検討の結果

(1) 計測データの精度

シルト岩に対して、循環水の送水量 q を変化させた実験ケースで得られた掘削変数の計測結果を図-4の左側に示す。記録を開始して移動距離 Z が0.02 mで模型地盤の上面にビットの先端が到達(タッチダウン)して、掘削が開始する。移動距離 Z が0.08 m(深度 $z = 0.06$ m)までは安定的な掘削に調整するために給圧一定の条件で行う予備掘削区間で、順調に掘削が進行していることを確認してから振動給圧制御を開始する。そして、若干の調整を行って、 $Z = 0.12$ m ($z = 0.10$ m) から基本条件の q が20 l/minのID-CCT サウンディングの区間に入る。その後、 Z が0.27 m ($z = 0.25$ m)で30 l/minに、 Z が0.48 m ($z = 0.46$ m)で45 l/minに q を増やし、 Z が0.62 m ($z = 0.60$ m)以降は逆に5 l/minずつ q を減じた。計測ボーリングの技術によって得られた掘削変数より、制御が確実に行われていることや、制御に伴う掘削状況の変化を的確に読み取ることができる。

ほとんどの実験ケースで、制御は概ね正確に行われた¹³⁾。しかし、掘削条件が変更された直後は、掘削変数に大きな変化が見られ、掘削がやや不安定になる場合がある。例えば図-4の移動距離 Z が0.48 ~ 0.49 m ($z = 0.46 \sim 0.47$ m)で循環水の送水量 q を30 l/minから45 l/minに増加させた直後に、循環水の送水圧 p や軸力 Q に不安定な変化が見られるが、すぐ定常状態に落ち着いている。極端な場合

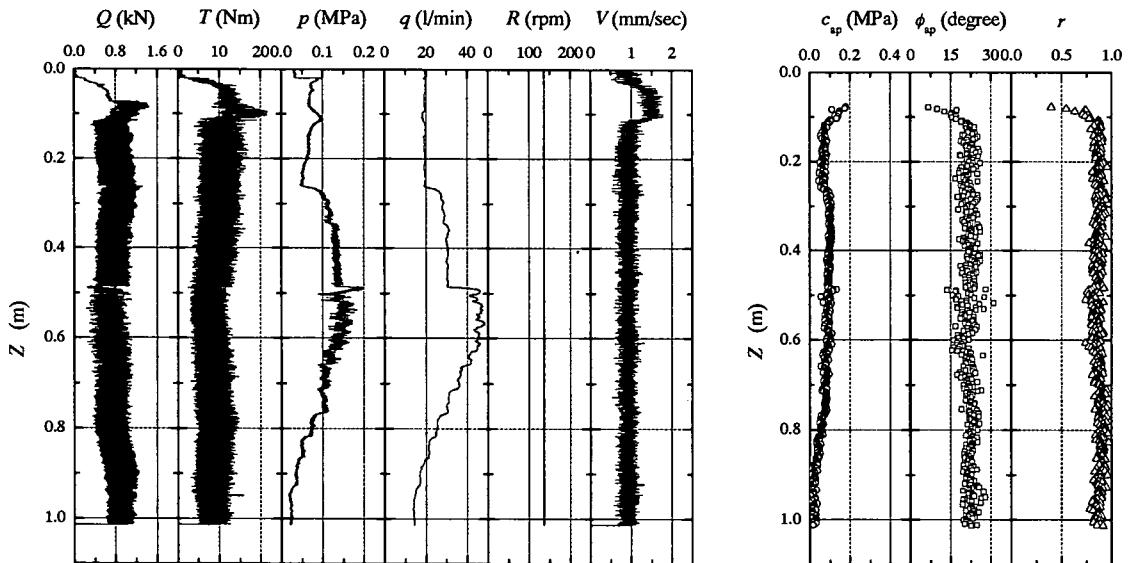


図-4 掘削変数の計測データと見かけの強度定数(シルト岩)

表-7 強度定数の比較

岩種	三軸圧縮試験				ID-CCT サウンディング ^{注1)}	
	有効応力表示		全応力表示		c_{ap} (MPa)	ϕ_{ap} (degree)
	c' (MPa)	ϕ' (degree)	c_{cu} (MPa)	ϕ_{cu} (degree)		
シルト岩	0.63	33.9	0.84	23.4	0.1(0.1)	20.3(2.0)
凝灰角礫岩	1.58	31.3	2.05	22.4	0.1(0.2)	22.9(4.6)

注1) 括弧の前は平均の値で、括弧内は標準偏差の値を示す。

には、特に過大な軸力を作用させる条件では掘進が阻害される場合もあったが、例外的である。

図-4の右側には、振動給圧制御の区間において1サイクル毎に計算した見かけの粘着力 c_{ap} と見かけのせん断抵抗角 ϕ_{ap} と共に、見かけの垂直応力 σ_{ap} と見かけのせん断応力 τ_{ap} との相関係数 r の深度分布を示している。この相関係数 r と採取されたコアとを対比すると、分離面が形成されたり緩くなった

りする部分で r の値が減少する傾向が見られた。また、シルト岩に比較して凝灰角礫岩の方が不均質性の影響でデータがばらつき、 r の値が低かった。よって、以後に示すサウンディング手法としての適用性と掘削条件の影響に関する検討では、考察に十分なデータが確保されることを考慮して、 r の値がシルト岩は0.71以下、凝灰岩は0.63以下のデータ(全体の約1割)を取り除いて行った。

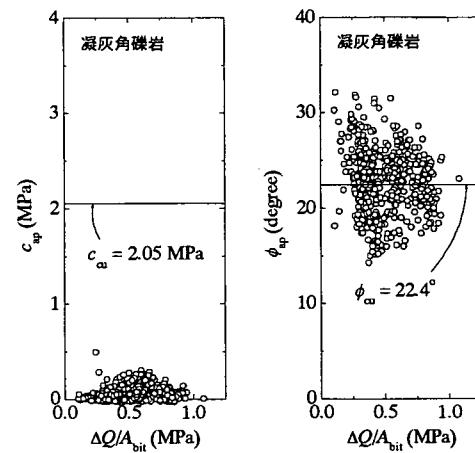
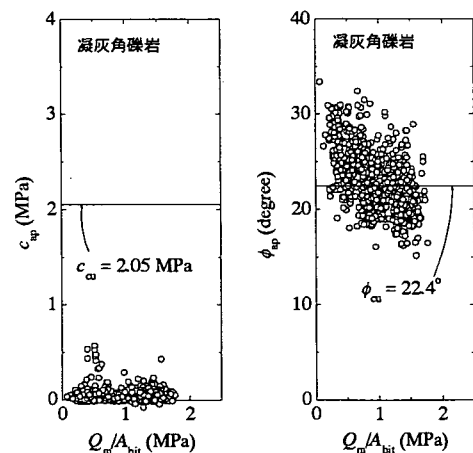
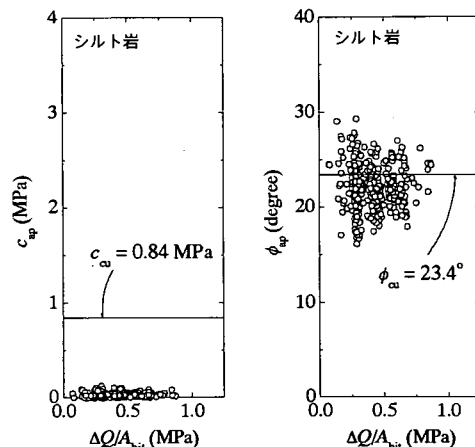
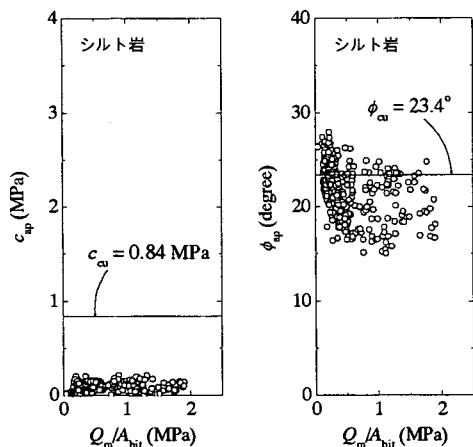


図-5 軸力の振動中心の影響

図-6 軸力の両振幅の影響

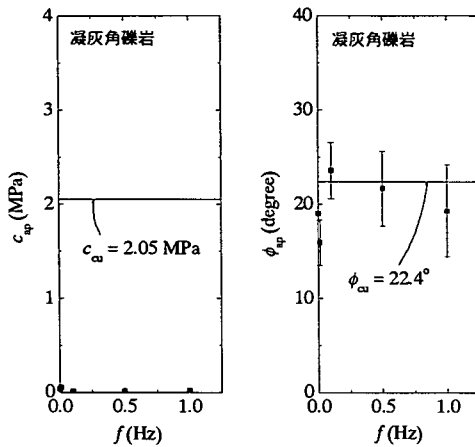
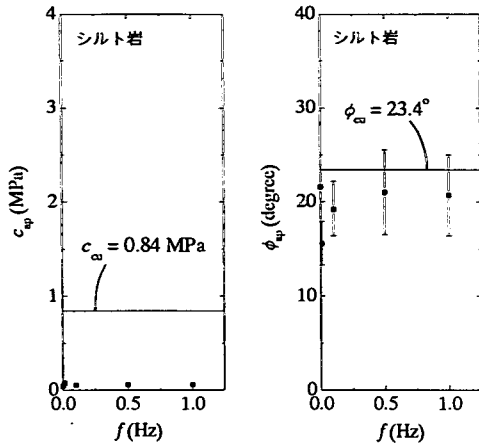


図-7 軸力の周波数の影響
(段階給圧条件 ($f = 0$ Hz) の実験結果も含む)

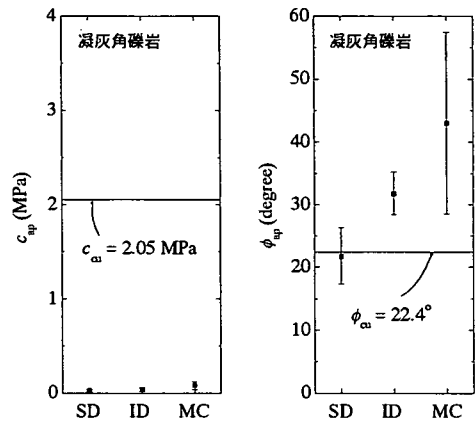
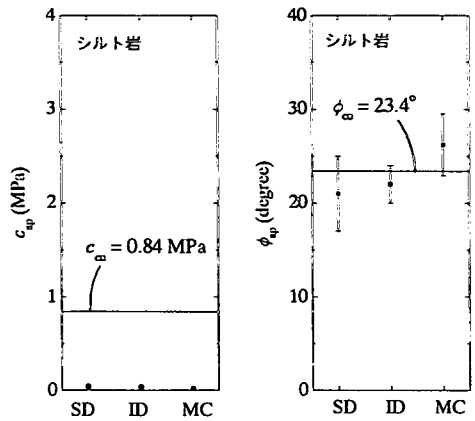


図-8 ビットの種類の影響

(2) サウンディング手法としての適用性の検討

2種類の堆積軟岩に対して、サウンディングとしての適用性を検討した結果を表-7に示す。ID-CCT サウンディングによる見かけの強度定数 (c_{ap} , ϕ_{ap}) は、表-6に示す基本条件に対応するものである。一方、比較に用いる三軸圧縮試験 (CUバー条件) による強度定数は、ID-CCT サウンディングにおいて過剰間隙水圧の影響を考慮していないので、全応力表示の強度定数 (c_{0a} , ϕ_{0a}) が適切であると考えた^{15), 16)}。

見かけの粘着力 c_{ap} は、三軸圧縮試験による粘着力 c_{0a} の値によらず、両岩種とも 0 MPa に近い値を示した。一方、見かけのせん断抵抗角 ϕ_{ap} は、両岩種とも三軸圧縮試験による全応力表示の値 ϕ_{0a} と概ね等しい。掘削条件の影響も考慮すべきであるので、この模型実験のデータに実地盤における既往のデータを加え、4章でさらに検討を行う。

(3) 掘削条件が及ぼす影響の検討

表-6に示す各掘削条件が、ID-CCT サウンディングによって得られる見かけの強度定数に及ぼす影響を検討した結果を図-5~10に示す。なお、図中には、比較のために三軸圧縮試験 (CUバー条件) により求まる全応力表示の強度定数 (c_{0a} , ϕ_{0a}) を実線で示した。

a) 軸力の影響

図-5と図-6に、軸力の振動中心 Q_m と両振幅 ΔQ の影響に関する検討結果をそれぞれ示す。

見かけの粘着力 c_{ap} に関しては、シルト岩も凝灰角礫岩も 0 MPa に近い値で、振動中心 Q_m にも両振幅 ΔQ にも依存しない。

一方、見かけのせん断抵抗角 ϕ_{ap} に関しては、両岩種とも振動中心 Q_m が大きくなると ϕ_{ap} の平均値がやや減少する。この傾向は、せん断抵抗角の拘束

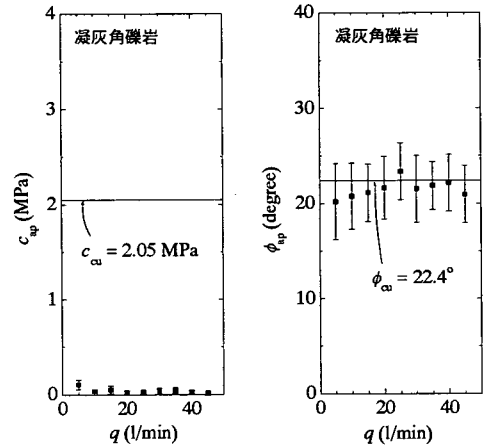
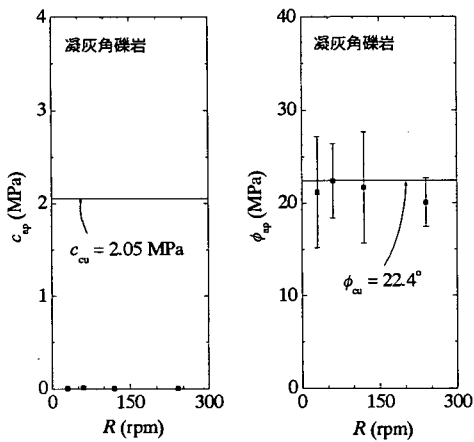
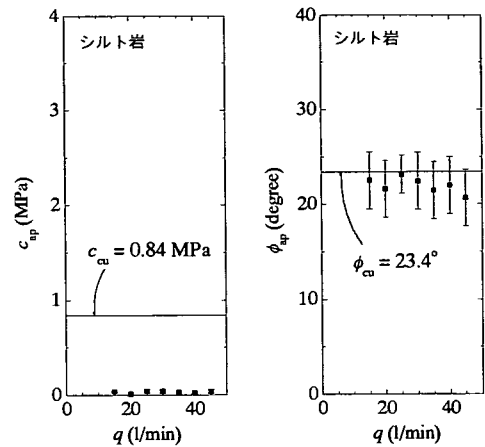
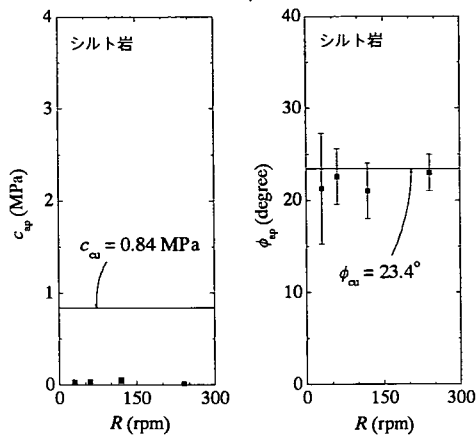


図-9 スピンドルの回転数の影響

図-10 循環水の送水量の影響

圧依存性を反映している可能性がある。また、両振幅 ΔQ を大きくしていくと ϕ_{ap} の平均値はあまり変化しないが、ばらつきが小さくなる。見かけの垂直応力 σ_{ap} ($= Q/A_{bit}$) の範囲を両振幅で 0.5 MPa より大きくすれば、 ϕ_{ap} の値を安定的に求められることが分かる。また、凝灰角礫岩のデータの方がシルト岩に比べてばらつきが大きいのは、両岩種の岩質の不均一性の違いに起因すると考えられる。

図-7 に軸力の周波数 f の影響に関する検討結果を段階給圧条件の実験 (周波数 0 Hz の振動給圧式に対応する条件) の結果と共に示す。図中の四角印と縦棒は、平均値と標準偏差の範囲を示している (図-8 ~10 も同じ)。

見かけの粘着力 c_{ap} に関しては、軸力の周波数 f に依存せず、ほぼ 0 MPa に近い値を示した。一方、見かけのせん断抵抗角 ϕ_{ap} に関しては、段階給圧条件の結果も含めて三軸圧縮試験より求まる ϕ_{a0} の周りにばらつき、軸力の周波数 f に依存する一定の傾向

はないようである。

b) ビットの種類の影響

図-8 にビットの種類の影響に関する検討結果を示す。見かけの粘着力 c_{ap} に関しては、軸力に関する傾向と同様に、ビットの種類による影響は見られず、0 MPa に近い値を示している。

一方、見かけのせん断抵抗角 ϕ_{ap} に関しては、ビットの種類に強く依存することが分かった。基本条件のサーフェス・セット・ダイヤモンド・ビット (SD ビット) と比較して、インプリグネーティッド・ダイヤモンド・ビット (ID ビット) ではやや高く、超硬メタル・クラウン・ビット (MC ビット) では凝灰角礫岩で特に高い値が得られた。現段階では原因は不明であるが、掘削のメカニズムが岩種とビットの組み合わせに依存するためであると推測される。ボーリングでは、地盤の種類に応じた適切な削孔ツールの選択が必要であるが、超硬メタル・クラウン・ビット (MC ビット) を軟質なシルト岩に適用する場

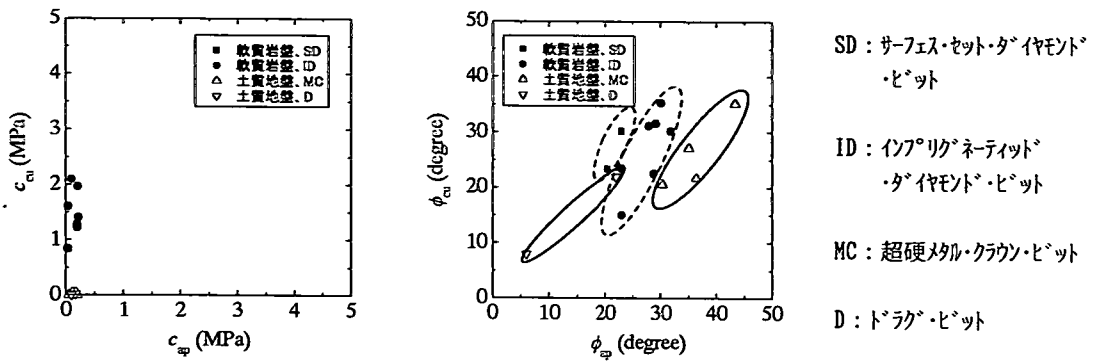


図-11 強度定数の比較 (左:粘着力, 右:せん断抵抗角)

合はあっても、比較的硬質な凝灰角礫岩に適用することは稀である。MC ビットを用いて凝灰角礫岩を掘削した実験における観察でも、ボーリング機械やロッドの振動が激しく、明らかに不適切な削孔ツールが選択されている状況であった。

c) スピンドルの回転数の影響

図-9にスピンドルの回転数 R の影響に関する検討結果を示す。見かけの粘着力 c_{ap} に関しては、他の掘削条件に関する傾向と同様に、 R の値の大小に関わらず0 MPaに近い値を示している。

一方、見かけのせん断抵抗角 ϕ_{ap} に関しては、平均値に対する影響はほとんど見られず、スピンドルの回転数 R の影響はない。また、凝灰角礫岩で120 rpmの場合を除いて、両岩種とも回転数 R と共にばらつきは小さくなる傾向を示しており、50 rpmより速い場合には ϕ_{ap} を安定的に求めることができそうである。

d) 循環水の送水量の影響

図-10に循環水の送水量 q の影響に関する検討結果を示す。見かけの粘着力 c_{ap} に関しては、他のパラメータに関する傾向と同様に、 q の値の大小に関わらず0 MPaに近い値を示している。また、見かけのせん断抵抗角 ϕ_{ap} に関しても、 q の影響は見られなかった。

4. 実地盤のデータも含めた検討の結果

サウンディング手法としての適用性を検討するために、過去に実地盤で得られたデータ(表-3参照)に模型地盤のデータを合わせて、ID-CCT サウンディングと三軸圧縮試験より求まる強度定数を図-11に比較した。各地盤における掘削の制御は、すべて同じボーリング機長(フォアマン)が最適と判断した条件で行われた。なおビットの種類に関しては、模

型地盤における検討結果より、その影響が大きいことが示されたので、図中に区別して示した。軟質岩盤ではダイヤモンド・ビット(SD ビットないしID ビット)が、土質地盤では鋼製のビット(MC ビットないしD ビット)が選択されている。

粘着力に関しては、地盤の種類(軟質岩盤/土質地盤)の種類やビットの種類によらず、 c_{ap} は0 MPaに近い値を示している。土質地盤(特に砂地盤)については c_{cu} と c_{ap} の値が概ね等しい関係($c_{cu} \approx c_{ap}$)となるが、むしろ c_{ap} の感度が低く、サウンディングとしての適用性が低いと判断せざるを得ない。

一方、せん断抵抗角に関しては、三軸圧縮試験による値 ϕ_{cu} と共にID-CCT サウンディングによる値 ϕ_{ap} が増加する一定の傾向が認められる。ただし、この ϕ_{cu} と ϕ_{ap} の関係は、図中に枠線で示すように地盤の種類、または、それに応じて適切に選択されたビットの種類に依存するようである。地盤の種類とビットの組み合わせによって、切羽が碎片に破壊される掘削のメカニズム(圧碎・切削・摩滅作用などによる地盤の引っ張り、またはせん断破壊)が異なるためと推測される。このメカニズムの詳細はよく分からないし、データもばらついているが、地盤の種類やビットの種類によって ϕ_{cu} と ϕ_{ap} の間には固有の関係が存在することは図-11より明らかである。今後、さらに適用事例を増やしていけば、ID-CCT サウンディングによって地盤のせん断抵抗角を推定する精度がより高くなると期待される。

5. 結論

岩石や岩盤の強度特性を低コストで簡便に評価することができる“振動給圧式ボーリングによるサウンディング(ID-CCT サウンディング)”に注目した。掘削条件が計測結果に及ぼす影響を明らかにすると

共に、軟岩や不均質岩（礫岩など）に対するデータを収集し、手法としての適用性を高めることを目的として実験的な検討を行った。その結果、以下に示す結論を得た。

- 1) ID-CCT サウンディングの結果に影響を及ぼす掘削条件はビットの種類だけで、軸力の振動中心 Q_m 、両振幅 ΔQ 、周波数 f 、さらにスピンドルの回転数 R や循環水の送水量 q に強く依存する傾向はなかった。したがって、地盤に対して最適な掘削条件を選択してサウンディングを行い、結果の評価では地盤の種類やビットの種類についてのみ考慮すれば良いことが分かった。
- 2) 地盤の種類やビットの種類によらず、見かけの粘着力 c_{ap} は 0 MPa に近い値が得られた。その結果、 c_{ap} の c_{cu} に対する感度が低く、サウンディングとしての適用性が低いと判断せざるを得ない。
- 3) せん断抵抗角に関しては、地盤の種類やビットの種類に応じて、固有の関係が存在することが分かった。よって、ID-CCT サウンディングによってせん断抵抗角 ϕ_{cu} の値を推定することが可能である。

今後は、ロータリー・ドリリングによる掘削のメカニズムを明らかにして地盤ないしビットの種類の影響や c_{cu} を推定する精度が低い理由を検討すること、他の計測変数や粘着力に対する感度が良い新たな計測情報などを利用して粘着力の推定方法を考案すること、地盤の種類やオペレータの技量などとデータのばらつきとの関係を検討すること、さらにデータの充実を図ってサウンディングとしての信頼性を高めるなどの技術開発が必要である。

謝辞：研究の遂行にあたって、岡田哲実氏（（財）電力中央研究所）、さらに西山幸司氏（基礎地盤コンサルタンツ（株））の協力を得た。末筆ながら深謝いたします。

参考文献

- 1) 谷 和夫：電力中央研究所における「計測ボーリング」技術の開発経緯，電力土木，No.278（11月号），pp.117-121，1998.
- 2) 宮崎 剛，酒井運雄，金子 進，湯川浩則：振動給圧掘削式原位置試験法について，第25回土質工学研究発表会，pp.153-154，1990.
- 3) 谷 和夫，池見元宣，金子 進，豊岡義則：計測ボーリングによって堆積軟岩の強度特性を評価する手法の検討，日本応用地質学会平成11年度研究発表会，pp.223-226，1999.
- 4) 塚田幸広，光橋尚司：ロータリーサウンディングによる新しい地盤改良の品質管理，土木技術，51巻10号，pp.85-91，1996.
- 5) 阿部正直，鈴木喜久，近藤巻広，杉山好司：エンパソルによるセメント改良体の一軸圧縮強度の推定，第31回地盤工学研究発表会，pp.441-442，1996.
- 6) 橋詰 茂，皆川聡一，伊藤毅浩，井上博之：地質性状の違いが示す削孔打撃エネルギーの変化について，土木学会第54回年次学術講演会，pp.80-81，1999.
- 7) 鈴木康嗣，笹尾 光，西 謙二，武居幸次郎：サイズミックコーンとロータリーパーカッションドリルを併用した地盤調査システム，日本建築学会技術報告集，第1号，pp.180-184，1995.
- 8) 中込敦久，谷 和夫，岡田哲実，中村敏明：計測ボーリングと室内三軸試験によって得られた堆積軟岩の強度定数の比較，第35回地盤工学研究発表会，pp.2239-2240，2000.
- 9) 我妻達弥，谷 和夫，金子 進：計測ボーリングによる振動給圧式サウンディングの砂地盤への適用性に関する実験的研究，土木学会第57回年次学術講演会，pp.1389-1390，2002.
- 10) 谷 和夫：ボーリング技術の高度化に関する研究—「計測ボーリングシステム」の開発と堆積軟岩における実証試験，電力中央研究所研究報告，U98021，1999.
- 11) 谷 和夫，川崎 了，金子 進，豊岡義則：室内ボーリング実験装置の開発，第31回地盤工学研究発表会，pp.417-418，1996.
- 12) 池見元宣，谷 和夫：計測ボーリングの室内実験システムの開発，第29回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.271-275，1999.
- 13) 三枝弘幸，谷 和夫，金子 進：堆積軟岩を対象とした振動給圧式サウンディング手法の掘削条件の影響に関する実験的検討，第11回岩の力学に関する国内シンポジウム，A10，6p，2002.
- 14) 谷 和夫，川崎 了，伊藤 洋：ボーリング技術の高度化に関する研究—均質な堆積軟岩におけるサンプリングによる試料の乱れの評価，電力中央研究所研究報告，U97066，1998.
- 15) 谷 和夫，池見元宣：三軸圧縮試験で見られた均質な軟岩のせん断挙動に関する寸法効果，第11回岩の力学国内シンポジウム，A14，6p，2002.
- 16) 中島 徹，谷 和夫，岡田哲実，中村敏明：原位置岩盤三軸試験の排水条件の実験的検討，第35回地盤工学研究発表会，pp.1001-1002，2000.

(2002. 4. 16 受付)

DEVELOPMENT OF SOUNDING METHOD OF INSTRUMENTED DRILLING UNDER
CYCLICALLY CONTROLLED THRUST
— INFLUENCE OF DRILLING CONDITIONS AND ITS APPLICABILITY —

Hiroyuki SAEGUSA, Kazuo TANI, Susumu KANEKO and Tatsuya WAGATSUMA

In-situ rock shear tests and laboratory shear tests are common for evaluating shear strengths of rock masses and rock cores. However, these methods are rather time consuming and costly, so that they are not appropriate for preliminary stage of geotechnical investigation. In this study, a novel technique of instrumented drilling under cyclically controlled thrust (ID-CCT) is developed as a simple and inexpensive sounding method for evaluation of strength characteristics of rock ground. A series of prototype drilling tests are conducted in two kinds of rocks, siltstone and tuff breccia, to investigate the influence of drilling conditions on the results of ID-CCT sounding. The tests demonstrate that the obtained results are insensitive to various drilling conditions except the type of drilling bit.